

Analisis Sistem Photovoltaic Beban Arus Searah Terhubung Jala PLN dengan Penyearah Terkendali

Winasis dan Muhammad Syaiful Aliim
Jurusan Teknik Elektro Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Mayjen Sungkono km 5 Kalimanah, Purbalingga, Jawa Tengah 53371
e-mail: winasis@unsoed.ac.id

Abstrak—Sistem *photovoltaic* (PV) dapat dihubungkan dengan jala utilitas untuk menjamin kehandalan dan kontinuitas suplai energi listrik. Meskipun luaran modul PV dan banyak beban listrik berupa arus searah (DC), akan tetapi kebanyakan sistem PV terhubung jala menggunakan grid arus bolak-balik (AC) melalui *inverter*. Penelitian ini menyajikan analisis sistem PV mikrogrid beban DC yang terhubung ke jala utilitas Perusahaan Listrik Negara (PLN) menggunakan penyearah terkendali. Rangkaian penyearah terkendali menggunakan *thyristor* yang dapat dikontrol sudut penyalanya untuk mengatur luaran tegangan dan arus yang dicatu dari utilitas. Simulasi konfigurasi sistem PV yang diusulkan dilakukan menggunakan software PSIM. Sistem menyuplai beban resistif berupa lampu DC. Simulasi dilakukan pada variasi resistansi beban dan sudut penyalan *thyristor*. Hasil simulasi menunjukkan rangkaian penyearah memiliki *ripple* tegangan 1,57 V (6,47%). Sedangkan efisiensi sistem pada berbagai kondisi pembebanan dan sudut penyalan bervariasi pada nilai antara 95,08%–97,72%. Efisiensi sistem tertinggi diperoleh pada kondisi sudut penyalan *thyristor* tinggi.

Kata kunci: *sistem photovoltaic, terhubung jala, mikrogrid dc, penyearah terkendali, efisiensi*

Abstract—Photovoltaic (PV) systems can be connected to the utility grid to ensure the reliability and continuity of the electrical energy supply. Although the output of the PV modules and many electrical loads are direct current (DC), most grid connected PV systems use alternating current (AC) grid through the inverter. This study presents an analysis of DC microgrid PV system connected to PLN utility grid using controlled rectifier. The controlled rectifier circuit uses a thyristor which can be controlled at its ignition angle to regulate the output voltage and current supplied from utility. The proposed PV system configuration simulations are performed using PSIM software. The system supplies resistive loads in the form of DC lights. Simulations are carried out with variations in load resistance and the thyristor ignition angle. The simulation results show the rectifier circuit has a voltage ripple of 1.57 V (6.47%). While the efficiency of the system under various loading conditions and ignition angle varies between 95.08%–97.72%. The highest system efficiency is obtained under high thyristor ignition conditions.

Keywords: *photovoltaic, grid connected, dc microgrid, controlled rectifier, efficiency*

Copyright © 2020 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan seperti: energi matahari dan angin saat ini menjadi alternatif dalam upaya pemenuhan terhadap kebutuhan energi listrik yang telah menjadi kebutuhan pokok masyarakat. Energi matahari sebagai sumber energi yang melimpah dan ramah lingkungan dapat dikonversi menghasilkan energi listrik menggunakan modul *photovoltaic* (PV) atau sel surya. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh sel surya ini berupa tegangan arus searah atau *Direct Current* (DC)

Dalam implementasinya terdapat tiga tipe sistem PV yaitu: a) tipe *stand-alone*; b) tipe hibrida and; c) tipe *grid connected*. [1] Pada sistem PV yang berdiri sendiri (*stand alone*) beban listrik hanya ditopang oleh *array* sel surya sehingga memiliki kehandalan rendah. Sistem PV dapat dipadukan dengan pembangkit lain sebagai sistem hibrida atau dihubungkan dengan jala-jala utilitas guna

memperbaiki kehandalannya. Sistem PV tipe hibrida memadukan beberapa sumber energi baru dan terbarukan, sehingga diharapkan dapat menyediakan catu energi listrik yang lebih efisien dan kontinu. Sedangkan sistem PV terhubung jala menggunakan jala-jala daya listrik utilitas sebagai *backup* [1] sehingga memiliki tingkat kehandalan yang paling tinggi.

Pada sistem PV *stand alone* yang mana hanya menggunakan teknologi PV dan tidak terhubung ke grid utilitas, tegangan luaran DC dari modul PV dapat digunakan secara langsung untuk mengoperasikan beban DC sedangkan bank baterai dimanfaatkan sebagai penyimpan energi yang akan dipakai saat ada permintaan [2]. Keunggulan tipe sistem PV *stand-alone off grid* ini adalah dapat beroperasi mandiri untuk memasok beban DC atau AC sehingga sangat cocok digunakan sebagai sumber energi listrik di daerah terpencil yang sulit terjangkau oleh jaringan listrik nasional. Akan sistem PV *off grid*

sangat tergantung pada ketersediaan cahaya matahari [3]. Modul PV juga tidak dapat menyimpan energi, sehingga diperlukan baterai untuk menyeimbangkan energi sistem PV. Guna mendapatkan tingkat kehandalan yang tinggi, Sistem PV *stand alone* membutuhkan sejumlah banyak baterai penyimpan energi untuk mengantisipasi kondisi cuaca buruk dimana PV hanya membangkitkan sedikit energi listrik. Hal ini tentu saja berdampak pada biaya investasi dan biaya energi (*cost of energy*) yang tinggi.

Koneksi sistem PV ke jala-jala listrik dapat menjamin kehandalan sistem dengan kebutuhan baterai yang minimal. Sebuah sistem terhubung jala listrik umumnya terdiri atas modul PV dan inverter untuk mengkonversi arus searah menjadi arus bolak-balik yang disinkronkan dengan sumber listrik utama sehingga kelebihan energi listrik yang dibangkitkan dapat dikirimkan ke jala-jala listrik. Samir Kouro [4] dan Mahela [5] memberikan gambaran ikhtisar komprehensif sistem PV terhubung jala-jala.

Salah satu permasalahan sistem PV terhubung jala adalah pada inverter yang merupakan komponen utama pada sistem PV terhubung jala-jala arus bolak-balik. Eltawil [6] menyajikan review tentang masalah teknis dan potensial pada sistem PV terhubung jala-jala. Berdasarkan hasil survei, didapatkan bahwa inverter pada PV terhubung jala memiliki efisiensi dan faktor daya di atas 90% dengan THD harmonik arus dibawah 5%. Sementara Ekici menyajikan rugi-rugi energi pada sistem PV terhubung jala-jala dimana komponen inverter memberikan sumbangan rugi daya sebesar 3% [7].

Koneksi dengan grid arus bolak-balik sebagai mikrogrid AC juga dihadapkan pada beberapa permasalahan seperti kebutuhan untuk sinkronisasi pembangkit, arus *inrush* pada transformer, aliran daya reaktif, arus harmonik, dan ketidaksetimbangan tegangan [8].

Pendekatan lain yang dikembangkan adalah sistem pembangkit terhubung grid DC sebagai sebuah mikrogrid DC. Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa kebanyakan beban elektronik pada instalasi rumah tinggal adalah beban arus searah. Penyaluran langsung energi listrik yang dihasilkan oleh PV ke beban dalam bentuk DC memberikan keuntungan berupa pengurangan rugi daya pada piranti inverter. Naoki Ayai [9] menyebutkan beberapa tujuan mikrogrid DC yaitu: meningkatkan pemakaian unit PV terdistribusi dan mengurangi disipasi energi dan biaya fasilitas untuk konversi dari DC ke AC. Beberapa kelebihan dari sistem mikrogrid DC antara lain: rugi energi lebih rendah, kehandalan lebih tinggi dan biaya investasi lebih rendah

Makalah ini menyajikan analisis sistem PV dengan grid beban DC yang terhubung jala-jala listrik utilitas pada instalasi rumah tinggal melalui rangkaian penyearah terkendali. Dibandingkan dengan sistem PV terhubung jala listrik yang umumnya menggunakan bus beban arus bolak-balik, model sistem yang diusulkan menggunakan bus beban arus searah yang lebih efisien. Koneksi dengan jala-jala utilitas bertujuan untuk menjamin kehandalan sistem. Beban DC yang disuplai adalah beban penerangan

lampu DC LED yang sekarang ini banyak dikembangkan karena lebih hemat energi, dan beban peralatan elektronik yang sebenarnya merupakan beban DC.

II. STUDI PUSTAKA

A. Sistem PV terhubung jala

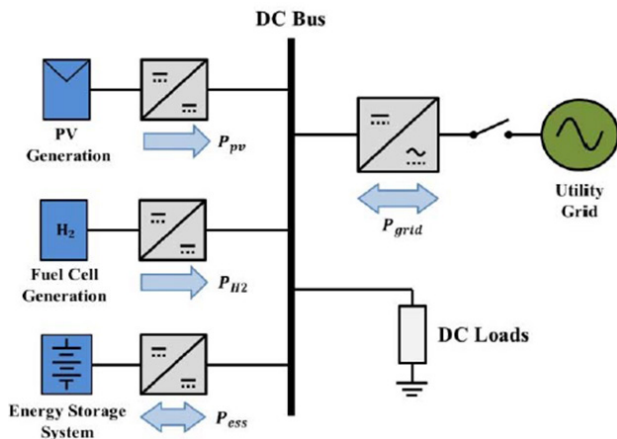
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan energi sinar matahari melalui sel surya (*photovoltaic*/PV). Sel surya mengkonversikan radiasi sinar matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis terbuat dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, atau bahan semikonduktor lainnya, yang kemudian tersusun menjadi modul surya.

Beberapa modul sel surya dihubungkan secara seri dan atau paralel membentuk *array* sel surya untuk mencapai nilai tegangan dan daya listrik yang diinginkan. Daya sel surya merupakan perkalian antara tegangan dan arus yang dihasilkan. Daya output modul sel surya sendiri merupakan fungsi intensitas cahaya matahari dan dipengaruhi oleh temperatur sel surya.

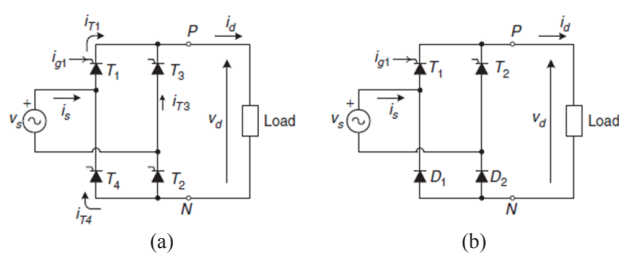
Sebuah sistem PV dapat dihubungkan dengan jala-jala listrik agar mendapatkan kontinuitas dan kehandalan yang tinggi. Grid-connected PV merupakan sistem PV yang terhubung dengan jaringan PLN. Berdasarkan pola operasinya sistem ini dapat berupa: sistem PV terhubung jala dengan *backup* penyimpan baterai (*Grid-connected PV with a battery backup*) dan sistem PV terhubung jala tanpa *backup* baterai (*Grid connected PV without a battery backup*). Sistem PLTS on grid konvensional umumnya tersusun atas array sel surya dan inverter yang berfungsi mengubah arus searah (DC) luaran PV dan baterai menjadi arus bolak-balik (AC), kemudian disinkronkan dengan sumber listrik utama untuk menyuplai beban AC [10].

Sistem PV juga dapat terhubung grid DC sebagai sebuah mikrogrid DC. Dalam sebuah sistem mikrogrid DC, daya AC dari utilitas dikonversi menjadi DC ketika memasuki bus DC menggunakan penyearah berefisiensi tinggi, kemudian daya listrik didistribusikan secara langsung ke peralatan DC yang dilayani oleh grid DC [11]. Umumnya sistem mikrogrid DC dilengkapi dengan komponen penyimpan energi agar dapat menyediakan catu daya yang stabil. Sumber DC juga harus membagi output dayanya untuk menstabilkan tegangan grid DC [12].

Gambar 1 menyajikan sistem mikrogrid DC dengan PV terhubung jala-jala listrik. Beberapa kelebihan dari sistem mikrogrid DC antara lain: rugi energi lebih rendah, kehandalan lebih tinggi dan biaya investasi lebih rendah. Fregosi menyajikan studi komparatif sistem mikrogrid pada gedung komersial menunjukkan sistem mikrogrid DC menggunakan energi PV 6–8 persen lebih efisien dibandingkan dengan menggunakan sistem tradisional AC [13]. Dari sisi rugi energi, sistem mikrogrid DC mengurangi rugi konversi AC ke DC dari rugi rata-rata 32% turun menjadi 10% [11]. Selain itu pada mikrogrid DC modul photovoltaic dapat langsung menyuplai secara



Gambar 1. Struktur mikrogrid DC terhubung jala utilitas [8]



Gambar 2. Rangkaian penyearah terkendali [14]

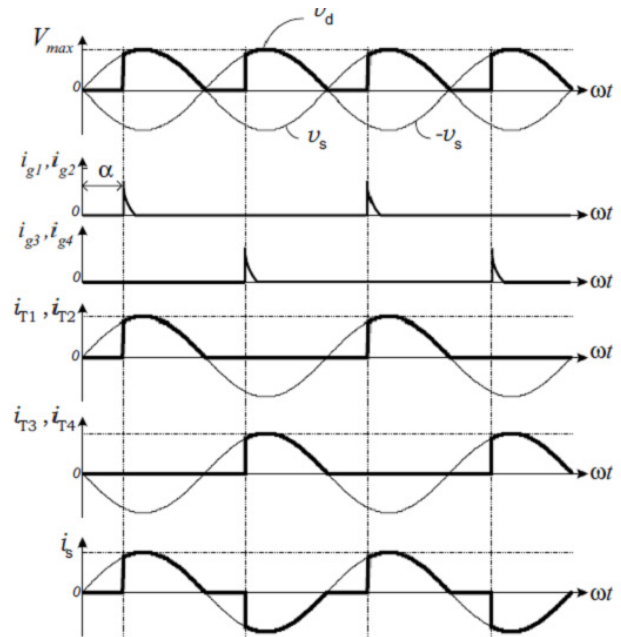
langsung beban DC tanpa rugi konversi berulang (DC ke AC ke DC) [11].

B. Penyearah Terkendali

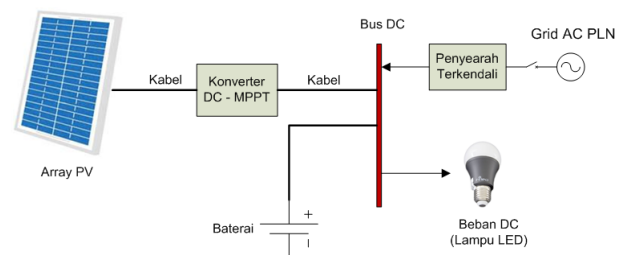
Penyearah terkendali (*controlled rectifier*) atau sering juga disebut dengan konverter merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak-balik dalam bentuk sinusoida menjadi tegangan luaran dalam bentuk tegangan searah yang dapat diatur atau dikendalikan. Komponen semikonduktor daya yang digunakan umumnya berupa *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) yang beroperasi sebagai sakelar, pengubah, dan pengatur.

Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu rangkaian konverter dapat digunakan tegangan bolak-balik satu fasa maupun tiga fasa. Konverter satu fasa merupakan rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik satu fasa, sedangkan konverter tiga fasa rangkaian penyearah daya dengan sumber masukan tegangan bolak-balik tiga fasa. Berbeda dengan penyearah daya, penyearahan dalam rangkaian konverter dapat dilakukan dalam bentuk penyearahan terkendali setengah gelombang (*halfwave*), penyearah gelombang penuh (*fullwave*), dan semikonverter. Pembebanan pada rangkaian penyearah terkendali juga dipasang beban resistif atau beban resistif induktif.

Gambar 2 menunjukkan penyearah jembatan gelombang penuh: (a) terkontrol penuh (b) terkontrol sebagian. Proses pemicuan pada SCR T_1 dan T_2 dilakukan secara serempak selama gelombang positif sumber tegangan. Sedangkan komponen SCR T_3 dan T_4 harus dipicu secara simultan pada periode gelombang negatif



Gambar 3. Cara kerja penyearah terkendali [14]



Gambar 4. Model sistem PV grid beban DC terhubung jala utilitas

[14]. Gelombang luaran rangkaian penyearah terkendali diperlihatkan pada Gambar 3.

Jika SCR T_1 dan T_2 dipicu sebesar α , maka nilai tegangan searah rerata (V_{dc}) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

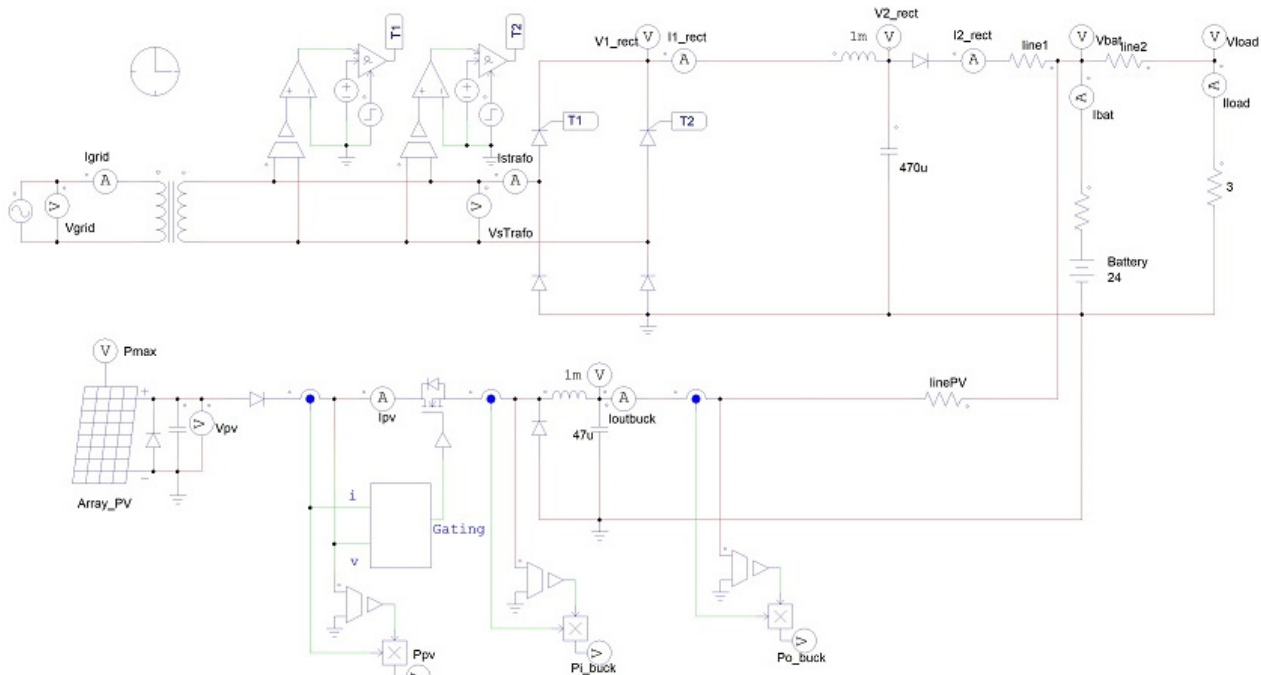
$$V_D = \frac{2V_{maks}}{\pi} \cos \alpha.$$

III. METODE

A. Model Sistem PV

Gambar 4 menyajikan model sistem PV yang diusulkan dengan bus beban DC terhubung jala-jala utilitas dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpan energi. Sistem PV grid beban DC terhubung jala utilitas pada penelitian ini tersusun atas *array PV*, *DC-DC Converter* dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), baterai sebagai penyimpan energi, jala-jala utilitas, dan konverter berupa penyearah terkendali menggunakan *thyristor* untuk mengubah tegangan bolak-balik dari utilitas menjadi tegangan searah. Hubungan rangkaian dari PV, baterai, beban dan luaran penyearah menggunakan kabel yang direpresentasikan dengan resistansi kabel.

Array PV menggunakan 4 modul PV dengan kapasitas



Gambar 5. Rangkaian simulasi sistem PV

Tabel 1. Parameter modul PV

Parameter	Data modul PV	Data Array PV
Daya maksimum	50 Wp	200Wp
Tegangan maksimum (Vmaks)	16,7 V	33,4 V
Arus maksimum (Imaks)	2,88 A	5,76 A
Tegangan hubung buka (Voc)	20,1 V	40,2 V
Arus hubung singkat	3,1 A	6,2 A

Tabel 2. Paramater rangkaian penyearah

Uraian	Deskripsi / nilai
Rasio trafo	10 : 1
Jenis penyearah	Gelombang penuh terkendali
Kendali thyristor	Alpha controller
Filter	Kapasitor 0,47 mF

total 200 Wp, dengan dua modul disusun secara seri untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi. Spesifikasi array PV yang digunakan pada simulasi dan pengujian mengacu pada modul PV yang terpasang pada Laboratorium Konversi Energi Fakultas Teknik UNSOED diperlihatkan pada Tabel 1.

Simulasi sistem PV menggunakan bus DC dengan tegangan nominal 24V pada baterai. Sistem terhubung dengan jala-jala PLN dengan tegangan nominal 220 V rms dan mencatu Beban DC berupa lampu DC 24 V yang terhubung secara paralel. Untuk simulasi, beban DC divariasi pada resistansi antara 3–12 Ohm (daya beban antara 48 W–192 W).

Gambar 5 menyajikan rangkaian simulasi sistem PV yang diusulkan. Sumber arus bolak-balik dari grid PLN dihubungkan ke bus DC melalui trafo penurun tegangan dan penyearah terkendali sebagian. Sedangkan array PV

Tabel 3. Parameter rangkaian konverter DC

Uraian	Deskripsi / nilai
Jenis converter	Buck converter
Duty cycle	0,73
Frekuensi switching	25 kHz
Kapasitor	47 μ F
Induktor	1 mH
Algoritma MPPT	Perturb and Observe

dihubungkan melalui konverter tipe *buck*.

B. Rangkaian Penyearah Terkendali

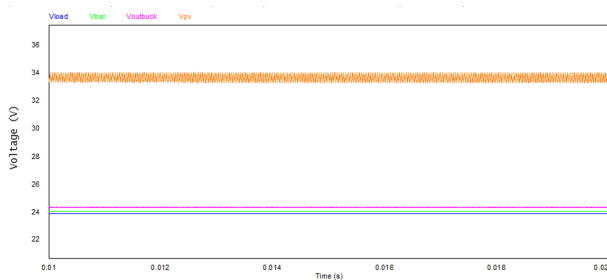
Rangkaian penyearah terkendali tersusun atas: (1) trafo *step down*, penyearah gelombang penuh dengan *thyristor* terkendali dan kapasitor sebagai filter untuk mengurangi *ripple* tegangan penyearah. Paramater rangkaian penyearah terkendali disajikan pada Tabel 2.

C. Konverter DC

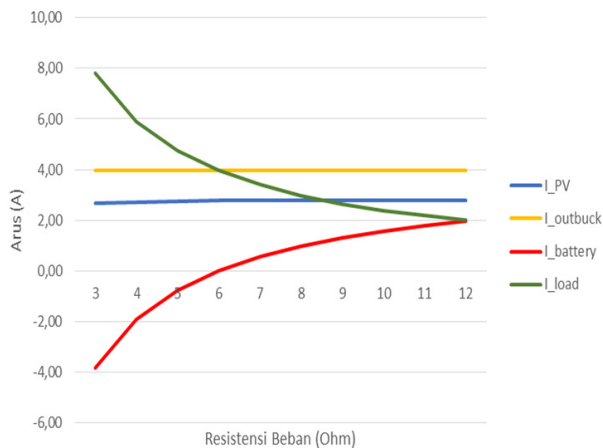
Konverter DC–DC pada PV dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk menyesuaikan tegangan pada PV agar beroperasi pada titik maksimalnya, dan tegangan luaran konverter sesuai dengan tegangan untuk pengisian baterai atau menyuplai beban. Deskripsi rangkaian konverter disajikan pada Tabel 3.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dan analisis dilakukan terhadap rangkaian sistem PV diusulkan yang terhubung dengan *buck converter*, baterai dan jala-jala listrik. Rangkaian simulasi sistem PV dengan bus beban DC yang terhubung dengan jala-jala AC PLN melalui rangkaian penyearah terkendali



Gambar 6. Tegangan PV, buck converter, baterai dan beban pada kondisi beban disuplai PV dan baterai



Gambar 7. Arus PV, buck converter, baterai, dan beban

disajikan pada Gambar 7.

Array PV 200 Wp terhubung ke baterai dan beban DC melalui konverter DC-DC dan saluran PV. Sedangkan sumber PLN terhubung ke baterai dan beban melalui rangkaian penyearah terkendali dan saluran kabel. Pengendalian rangkaian penyearah menggunakan *alpha controller*. Sedangkan pengoptimalan daya PV dilakukan oleh konverter DC-DC.

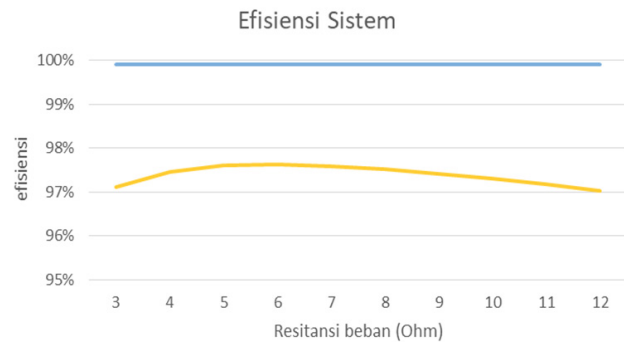
Simulasi sistem dilakukan menggunakan software PSIM pada beberapa skenario simulasi sebagai berikut: 1) beban hanya disuplai oleh PV dan baterai, 2) beban disuplai oleh jala PLN dan baterai dan 3) beban disuplai oleh jala PLN dan baterai.

A. Simulasi beban disuplai oleh PV dan baterai

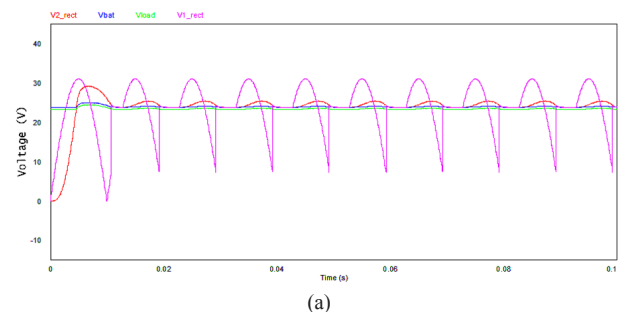
Untuk mengetahui unjuk kerja dari konverter DC-DC dan rangkaian MPPT pada sisi PV, beban divariasi pada nilai 3 hingga 12 Ω . Gambar 6 menyajikan bentuk gelombang tegangan PV (V_{pv}), luaran *buck converter* ($V_{outbuck}$), baterai (V_{bat}), dan beban (V_{load}).

Rangkaian *buck converter* menjaga tegangan luaran PV pada nilai mendekati nilai tegangan maksimumnya (V_{mpp}) agar daya yang dihasilkan PV menjadi maksimal. Tegangan PV memiliki ripple tegangan 0,54 V (1,61%) karena proses pensaklaran di konverter. Akan tetapi tegangan luaran *buck converter* memiliki ripple yang sangat kecil yaitu 0,01 V (0,05%) karena sisi luaran konverter terhubung dengan baterai.

Pada simulasi variasi perubahan beban, menunjukkan tegangan dan arus luaran PV relatif konstan pada 33,6 V



Gambar 8. Efisiensi sistem pada variasi resistansi beban

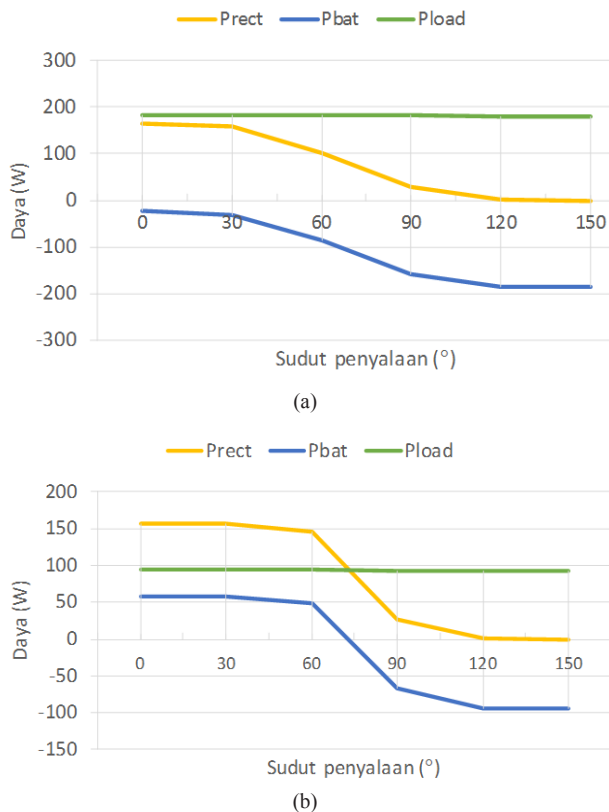


Gambar 9. (a) tegangan dan (b) arus sistem pada kondisi beban disuplai PLN dan baterai

dan 2,7 A. Kenaikan nilai resistansi beban berpengaruh terhadap kenaikan tegangan pada sisi beban akibat berkurangnya arus beban. Rangkaian *buck converter* memiliki efisiensi yang sangat baik yaitu 99%. Sedangkan efisiensi sistem bervariasi antara 97,1%–97,6% dipengaruhi oleh aliran daya pada komponen dan saluran (Gambar 8). Efisiensi sistem tertinggi diperoleh pada saat arus pengisian atau pengosongan yang mengalir di baterai pada kondisi minimal.

B. Simulasi beban disuplai oleh PLN dan baterai

Gambar 9 menunjukkan bentuk gelombang tegangan dan arus pada sistem pada saat beban hanya disuplai oleh jala-jala PLN dan baterai. Tegangan keluaran penyearah memiliki ripple tegangan yang cukup besar yaitu 1,57 V (6,47%). Hal ini berdampak pada nilai ripple arus yang tinggi yang menyebabkan pengisian dan pengosongan baterai secara periodik. Faktor yang menyebabkan adalah nilai kapasitor yang digunakan masih relatif kecil dibandingkan konsumsi arus yang diserap oleh beban dan baterai.



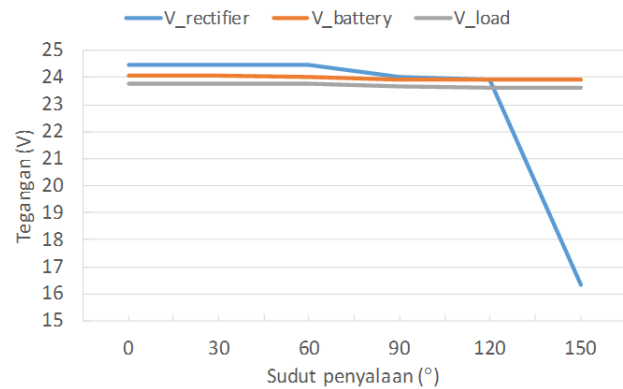
Gambar 11. Daya penyearah dan baterai pada berbagai sudut penyalan (a) beban 3 Ohm, (b) beban 6 Ohm

Gambar 10–11 menyajikan tegangan dan aliran daya pada sistem ketika sudut penyalan *thyristor* diubah dari 0° hingga 150°, dengan resistansi beban pada 3 Ohm dan 6 Ohm. Pada kondisi beban 3 Ohm, tegangan beban pada kisaran 23,43 V hingga 23,3 V dengan daya beban antara 183,06–180,98 W. Sedangkan penyearah memberikan catu daya sebesar 165,95 W pada saat sudut penyalan *thyristor* sebesar 0° dengan nilai yang berkurang hingga 0,72 W pada sudut penyalan *thyristor* sebesar 120°. Kekurangan kebutuhan daya beban diambilkan dari baterai. Baterai menyuplai daya sebesar 22,06 W saat sudut penyalan *thyristor* sebesar 0° hingga 185,2 W saat penyearah tidak mencatu daya listrik ke sistem.

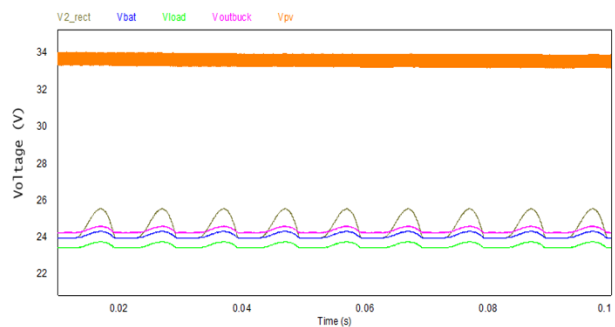
Pada kondisi resistansi beban yang lebih tinggi sebesar 6 Ohm, daya beban adalah lebih rendah diantara 94,17 sampai 93,18 W. Pada sudut penyalan rendah, penyearah mengalirkan arus listrik dengan daya lebih besar dari kebutuhan beban, sehingga sebagian daya listriknya digunakan untuk melakukan pengisian pada baterai. Hal ini diperlihatkan pada arus baterai yang bernilai positif. Saat sudut penyalan *thyristor* dinaikkan, arus dari penyearah berkurang hingga lebih kecil dari kebutuhan daya listrik beban. Pada kondisi ini baterai mengalirkan daya listrik ke beban ditunjukkan dengan nilai arus baterai yang negatif.

C. Simulasi beban disuplai oleh PV, PLN dan baterai

Pada simulasi ini, beban dicatu oleh PV, baterai dan luaran penyearah. Gambar 12 menyajikan bentuk



Gambar 10. Tegangan pada sudut penyalan *thyristor* yang berbeda

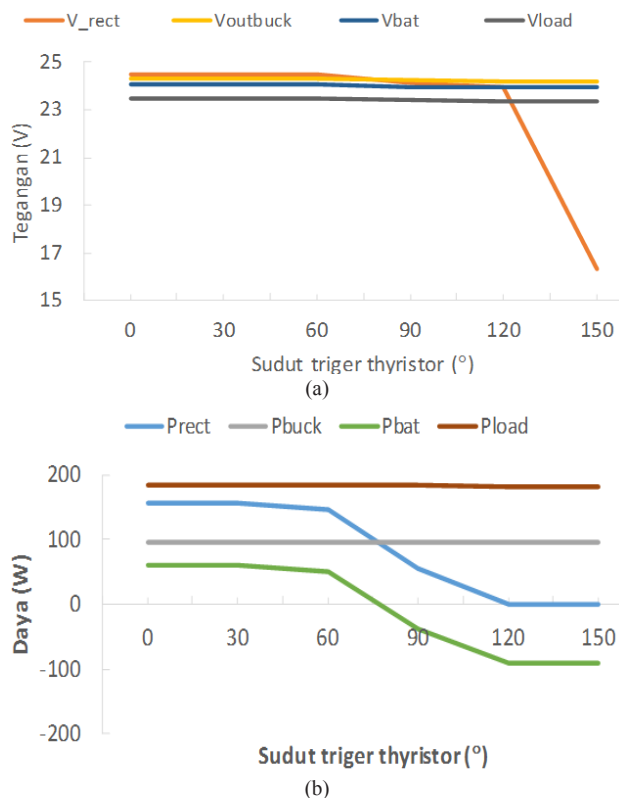


Gambar 12. Tegangan sistem pada kondisi beban disuplai PV, PLN dan baterai

gelombang tegangan PV, tegangan output *buck converter* pada PV, tegangan baterai, tegangan penyearah dan tegangan beban pada kondisi sudut penyalan *thyristor* 0° dan resistansi beban 3 Ohm. Tegangan penyearah memiliki *ripple* yang masih tinggi (1,5V), meskipun *ripple* tegangan pada sisi beban adalah relatif kecil akibat nilai tegangan baterai dan output konverter DC pada PV yang nilainya relatif tetap. *Ripple* tegangan luaran penyearah ini menyebabkan fluktuasi besaran arus yang disuplai oleh penyearah dan baterai. Sementara arus listrik yang disuplai dari PV bernilai konstan karena rangkaian MPPT pada konverter DC mempertahankan operasi PV pada nilai daya maksimalnya.

Tegangan dan aliran daya pada sistem pada variasi sudut penyalan diperlihatkan pada Gambar 13. Arus yang disuplai dari PV relatif tetap. Kenaikan sudut penyalan *thyristor* berpengaruh pada penurunan tegangan dan aliran daya dari jala-jala PLN melalui rangkaian penyearah. Dibandingkan dengan pada simulasi sebelumnya ketika sistem PV belum dihubungkan, pada sudut penyalan yang sama daya listrik yang dicatu dari rangkaian penyearah lebih rendah. Penurunan ini lebih disebabkan kenaikan tegangan pada sisi baterai karena pengaruh luaran konverter DC PV, sehingga aliran arus dari penyearah menjadi lebih kecil. Pada saat sudut penyalan *thyristor* dinaikkan arus yang dicatu dari rangkaian penyearah terkendali mengalami penurunan.

Pada sudut penyalan rendah, suplai daya dari penyearah dan PV lebih besar dari kebutuhan beban sehingga aliran daya sistem adalah dari PV dan penyearah menyuplai daya beban dan melakukan pengisian ke baterai. Penurunan nilai arus penyearah ketika sudut penyalan dinaikkan



Gambar 13. (a) tegangan dan (b) daya sistem disuplai PV, PLN dan baterai pada variasi sudut penyalan *thyristor*

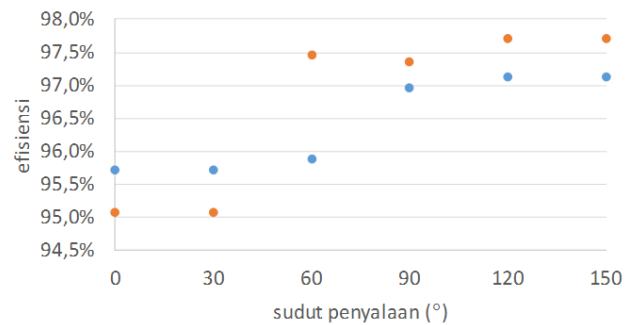
memperkecil arus pengisian ke baterai, hingga saat total daya arus PV dan penyearah lebih kecil dari kebutuhan daya beban maka aliran daya pada baterai akan berbalik bersama-sama menyuplai kebutuhan daya listrik beban. Pada kondisi sudut penyalan di atas 120° tegangan luaran penyearah lebih rendah dari tegangan sistem sehingga rangkaian penyearah tidak lagi menyuplai daya listrik ke beban.

Hasil simulasi sistem PV beban DC terhubung jala pada variasi beban dan sudut penyalan *thyristor* menunjukkan sistem memiliki efisiensi yang baik (Gambar 14).

Efisiensi sistem terendah sebesar 95,02% pada saat sudut penyalan *thyristor* rendah. Kenaikan sudut penyalan *thyristor* berpengaruh pada kenaikan efisiensi sistem. Efisiensi tertinggi sistem sebesar 97,72% pada sudut penyalan tinggi dimana rangkaian penyearah tidak mencatu daya listrik ke beban.

V. KESIMPULAN

Sistem PV terhubung jala dengan grid beban DC yang diusulkan menggunakan rangkaian penyearah terkendali dengan modul *thyristor* untuk mengkonversi tegangan arus bolak-balik dari jala-jala PLN menjadi tegangan searah pada nilai yang dapat diatur dengan mengubah sudut penyalan *thyristor*. Berdasarkan hasil simulasi, pengaturan sudut pemucuan *thyristor* berpengaruh pada aliran daya dari jala PLN. Rangkaian penyearah memberikan suplai daya yang lebih besar saat sudut penyalan *thyristor* rendah. Sebaliknya saat sudut penyalan tinggi, arus dari



Gambar 14. Efisiensi sistem pada variasi sudut penyalan *thyristor*

rangkaian penyearah akan menurun bahkan dapat tidak mencatu arus listrik. Karakteristik ini dapat dimanfaatkan untuk mengatur aliran daya listrik dari jala-jala PLN ke beban menyesuaikan kondisi beban dan energi listrik yang dihasilkan oleh PV. Hasil simulasi juga menunjukkan rangkaian yang diusulkan memiliki efisiensi yang baik antara 95%–97,7%. Efisiensi tertinggi diperoleh saat penyearah tidak mencatu daya listrik ke sistem saat sudut penyalan tinggi.

REFERENSI

- [1] J.R. Balfour, M. Shaw, and N.B. Nash. *Introduction to Photovoltaic System Design*. USA: Jones & Bartlett Publishers, 2011.
- [2] M. Ishaq, U.H. Ibrahim, and H. Abubakar, "Design of An Off Grid Photovoltaic System: A Case Study of Government Technical College, Wudil, Kano State," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 2, issue 12, pp.175-181, Dec 2013.
- [3] Syafii, Y. Mayura, dan Muhardika, "Strategi Pembebanan PLTS Off Grid untuk Peningkatan Kontinuitas Suplai Energi Listrik," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 3, pp. 167-151, Desember 2019.
- [4] S. Kouro, J.I. Leon, D. Vinnikov and L.G. Franquelo, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 47-61, March 2015.
- [5] O.P. Mahela, and A.G. Shaik, "Comprehensive Overview of Grid Interfaced Solar Photovoltaic Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, part 1, pp. 316-332, Feb 2017.
- [6] M.A. Eltawil, Z. Zhao, "Grid-Connected Photovoltaic Power Systems: Technical and Potential Problems - A Review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, issue 1, pp. 112-129, Jan 2010.
- [7] S. Ekici, and M.A. Kopru, "Investigation of PV System Cable Losses," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol.7, no.2, 2017.
- [8] M.S. Neves, M.A. Aredes, H. Khezri, E.T.H. Ida, and M. Aredes, "Advantages of Grid Tied DC Micro Grid," *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Nov 2017.
- [9] N. Ayai, T. Hisada, T. Shibata, H. Miyoshi, T. Iwasaki, and K. Kitayama, "DC Micro Grid System," *SEI Technical Review* Number 75 October 2012.
- [10] Winasis, Suroso, H. Prasetyo, A. Noviana, "Analisis Sistem Mikrogrid DC Photovoltaic Terhubung Jala-jala," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, Malang, Oktober 2018.

- [11] D.R. Prasad, B.R. Kamath, K.R Jagadisha, and S.K. Girish, "Smart DC Micro-Grid for Effective Utilization of Solar Energy," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, Issue 12, Dec 2012.
- [12] P. John, and B.K. Mathew, "Operation and Control of Solar PV Based DC Microgrid," *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*, vol. 2, Issue 9, 2015.
- [13] D. Fregosi, et all. "A Comparative Study of DC and AC Microgrids in Commercial Buildings Across Different Climates and Operating Profiles". *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Jun 2015.
- [14] M.H. Rashid, *Power Electronics Handbook, Devices Circuits and Applications*: Elsevier, 2011.